

PERENCANAAN STRUKTUR BALOK UTAMA JEMBATAN BAJA KOMPOSIT DENGAN PROFIL *CASTELLATED BEAM*

Banu Adhibaswara

*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Gunadarma, Depok
Jalan Margonda Raya 100 Depok, Jawa Barat 16424
banu_adhi@yahoo.co.id*

Abstrak

Sebagai seorang perencana yang baik dalam mendesain jembatan tidak hanya berdasarkan prinsip keamanan dan kenyamanan, namun juga harus memperhatikan aspek fungsional dari material yang digunakan. Penggunaan profil baja yang efisien pada jembatan baja komposit merupakan salah satu cara yang dapat mendukung aspek fungsional tersebut. *Castellated beam* dapat dikategorikan sebagai profil istimewa, karena bentuknya yang memiliki nilai estetika dan daya guna serta dapat meningkatkan kapasitas momen. Penggunaan profil ini masih sangat jarang digunakan di Indonesia karena merupakan inovasi yang baru, sehingga memungkinkan untuk menjadi alternatif yang baik dalam desain jembatan baja komposit. Oleh karena itu pada penelitian ini akan direncanakan sebuah jembatan baja komposit yang aman, nyaman dan efisien dengan memanfaatkan profil *castellated beam*. Berdasarkan analisa didapatkan bahwa balok induk jembatan dengan bentang 16 m layak dan aman menggunakan profil *castellated beam*. Balok ini cukup kuat dengan ukuran panjang lubang 28,5 inci, tinggi lubang 20 inci, jarak antar lubang 8,5 inci dan sudut lubang 45°. Aspek kenyamanan juga terpenuhi karena lendutan yang terjadi yaitu 0,812 cm kurang dari lendutan yang disyaratkan sebesar 2 cm.

Kata Kunci: Jembatan, Baja Komposit, *Castellated Beam*.

PENDAHULUAN

Tanggung jawab dari seorang perencana struktur tidak hanya berupa desain struktur berdasarkan prinsip keamanan dan kenyamanan, namun juga harus memperhatikan aspek kebutuhan fungsional dari material dan bahan yang digunakan. Salah satu bentuk perhatian terhadap material yang digunakan adalah penggunaan profil baja sebagai balok jembatan yang berbeda dibandingkan penggunaan profil baja pada umumnya. *Castellated beam* termasuk salah satu jenis material baja yang dapat dikategorikan sebagai profil istimewa dalam dunia teknik sipil, karena selain bentuknya yang memiliki nilai estetika ternyata profil ini juga memiliki beberapa kelebihan ditinjau dari segi kekuatannya. Kelebihan utama dari *castellated beam* adalah berupa peningkatan kekuatan berdasarkan kenaikan lengan momen (*depth*) dari penampang tersebut (Demirdjian, 1999). Para pakar teknik telah berupaya untuk mengembangkan material dan pelatihan terhadap desain dan konstruksi dari

castellated beam. Salah satu pengembangan yang dilakukan adalah pada pertengahan tahun 1930. Seorang ahli teknik asal Argentina, Geoffrey Murray Boyd, menemukan sebuah inovasi pada balok yang diberi nama *Boyd Beam* (Knowles, 1991). Seiring dengan berjalannya waktu, berbagai penelitian dan pengembangan terus dilakukan hingga pada akhirnya dihasilkan sebuah balok dengan profil baru yang diberi nama *castellated beam*. Melihat dari berbagai hal tersebut, penulis merasa tertarik untuk membuat suatu studi penelitian tentang balok *castellated* yang diterapkan sebagai balok utama pada struktur jembatan baja komposit.

METODE PENELITIAN

Cara yang digunakan penulis dalam menyelesaikan perencanaan jembatan adalah dengan mengumpulkan data dan informasi tentang lokasi jembatan serta beban-beban yang bekerja dalam bentuk studi kasus. Jembatan yang akan direncanakan adalah jembatan jalan raya yang melintasi sungai

dan berlokasi di ruas jalan Geumpang (Pidie) – Tutut (Aceh Barat), provinsi Nangroe Aceh Darussalam. Lokasi ini terletak pada zona II daerah gempa serta berada cukup jauh dari garis pantai. Bentang jembatan bersih yang akan dibuat adalah 16 m, sesuai dengan lebar bersih yang tersedia. Jembatan perlu dihitung sesuai dengan persyaratan yang berlaku di dalam standar SNI T-12-2004. Perencanaan struktur atas yaitu gelagar induk dengan *castellated beam* menggunakan metode *Allowable Stress Design* (ASD).

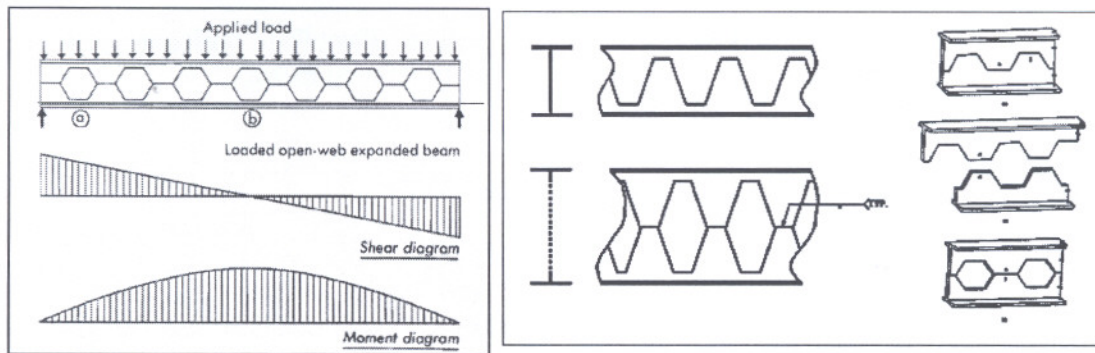
Langkah perencanaan tersebut dimulai dari desain lubang dan *properties* melintang *castellated beam* yang harus mengikuti syarat-syarat modulus dan kekuatan penampang. Perhitungan tegangan lentur tekan izin dapat dijaga dalam batas izin bila tegangan geser pada pinggir lubang harus memenuhi syarat dari tegangan geser izin. Dari tegangan geser maksimum akibat beban dan tegangan geser izin dapat direncanakan jarak pemisah antar lubang. Jarak ini biasanya konstan sepanjang bentang balok. Namun mungkin saja jarak ini divariasikan terhadap jarak-jarak tertentu pada bentang, yaitu pada perletakan ada jarak tertentu dan pada $\frac{1}{4}$ sampai $\frac{3}{4}$ bentang ada jarak tertentu lagi.

Pada pengecekan tegangan lentur yang terjadi pada perletakan tidak ada momen lentur utama sehingga tidak ada gaya aksial tekan beraksi pada penampang T ini. Bila setelah pengecekan ternyata tegangan lentur tidak memenuhi tegangan lentur izin yang ditentukan, maka profil harus diestimasi ulang terhadap ketinggian lubang saja (h). Sudah diketahui bahwa tegang lentur mungkin terdiri dari tegangan lentur utama (σ_b) dan tegangan lentur sekunder (σ_T). Jika tegangan lentur utama dibawah tegangan izin tetapi tegangan lentur sekunder tidak memenuhi, maka ketinggian lubang (h) dapat dikurangi. Pengurangan tinggi lubang akan berdampak pada penurunan drastis dari tegangan lentur sekunder dan sedikit kenaikan pada tegangan lentur utama (Ommer Blodgett, 1991). Jika ternyata tinggi lubang tidak dapat dikurangi karena σ_b sudah dekat

dengan tegangan izin, maka dapat digunakan dua ukuran jarak pemisah antar lubang yang berbeda. Tahapan selanjutnya setelah cek tegangan lentur adalah mengecek momen nominal dari penampang. Sebenarnya cek momen nominal ini dapat diabaikan, karena secara teoritis lubang tidak mempengaruhi banyak kekuatan dari profil WF. Tahapan terakhir dalam perencanaan adalah pengecekan *web buckling* akibat gaya geser horisontal. Untuk mencegah *web buckling* dapat menggunakan pengaku lateral pada baji atau memperbesar jarak antar lubang (e).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara singkat *castellated beam* dibuat dengan cara memotong bagian badan dari baja profil I atau *wide flange* dengan pola gerigi gergaji (zig-zag) di sepanjang bentang profil tersebut. Kemudian masing-masing bagian tersebut disambung dengan las di salah satu ujungnya sehingga dihasilkan penampang baru (Gambar 1). Balok *castellated* dapat dibuat secara ekonomis dengan menggunakan balok baja yang dipotong mengikuti pola zig-zag sepanjang garis tengah balok. Ujung potongan yang serupa kemudian disambung satu sama lain dengan las busur. Pada balok profil I atau WF, bagian sayap pada profil memegang peranan yang sangat penting dalam menahan tegangan lentur sehingga kehilangan luas pada badan akibat lubang tidak terlalu berpengaruh, sepanjang momen masih diperhitungkan. Bagaimanapun tegangan geser yang harus diperhitungkan pada lubang badan yang ada. Pada bagian lubang badan, dua buah profil T seolah-olah bekerja sebagai bagian yang menahan gaya geser vertikal. Pada titik b (Gambar 1), gaya geser minimum sehingga hanya memberikan sedikit efek pada kekuatan balok. Pada titik a yang dekat dengan perletakan, gaya geser yang dihasilkan cukup besar, sehingga tegangan yang dihasilkan dari beban pada balok harus dihitung berdasarkan penampang T karena berlubang.



Gambar 1. *Castellated Beam*
Sumber: Blodgett (1996)

Jembatan yang akan dibangun merupakan ruas jalan utama yang dilalui oleh kendaraan dengan lalu lintas padat, sehingga dibuat 2 lajur dengan trotoar di sisi kanan dan kiri dari jembatan. Jembatan yang akan direncanakan adalah tipe gelagar-dek (*deck-girder*) baja komposit dengan gelagar utama merupakan balok *castellated*. Jembatan terdiri atas gelagar utama arah memanjang dengan pelat beton membentang antara gelagar. Spasi gelagar longitudinal atau balok lantai dibuat sedemikian sehingga hanya cukup digunakan pelat tipis yang akan menyebabkan beban mati relatif kecil. Jembatan tipe ini digunakan secara luas dalam konstruksi jalan raya, penggunaannya akan lebih ekonomis pada bentang 8 – 20 m pada kondisi normal (Bina Marga, 2005). Model struktur dianggap sebagai jembatan sederhana yang bertumpu pada dua perletakan (*simple beam*), karena tidak memiliki pilar. Rasio tinggi balok *castellated* dengan tinggi balok WF *hot rolled* adalah sebesar 1,5.

Data Pembebanan

Untuk menghitung gaya dalam perlu dicari terlebih dahulu beban-beban maksimum akibat dari kombinasi beban di balok tepi atau balok tengah. Perhitungan beban layan merupakan perhitungan beban tanpa faktor yang akan digunakan dalam perencanaan balok *castellated*. Berdasarkan analisa diketahui bahwa beban terbesar berada pada balok tepi, karena balok tepi selain menahan beban perkerasan jalan juga menahan beban trotoar. Dari perhitungan SAP 2000 v.11 diperoleh nilai gaya momen dan geser maksimum yaitu $M_{maks} = 9787275,851$ kg dan $V_{maks} = 64751,173$ kg.

Analisis Data

Mutu baja yang akan digunakan $f_y = 50$ ksi dengan tegangan izin lentur, $\bar{\sigma} = 30$ ksi = 30000 psi dan tegangan izin geser, $\bar{\tau} = 20$ ksi = 20000 psi. Langkah pertama analisis adalah menentukan *section modulus* dari balok WF yang akan dijadikan *castellated beam*. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$S_g = \frac{M_{max}}{\bar{\sigma}} = \frac{9787275,851}{30000} = 326,243 \text{ in}$$

Langkah selanjutnya adalah menentukan hubungan antara *castellated beam* dan balok WF, dimana $K_1 = d_b / d_g \rightarrow$ Asumsikan $K_1 = 1,5$. Selanjutnya coba WF yang akan direncanakan berdasarkan S_x .

$$S_b = S_g / K_1 = 326,243 / 1,5 = 217,495 \text{ in}^3 \text{ (gunakan sebagai acuan)}$$

Coba dengan WF 24 x 94 dengan ukuran:

$$S_b = 222 \text{ in}^3, d_b = 24,31 \text{ in}, t_w = 0,515 \text{ in}, b_f = 9,065 \text{ in}, t_f = 0,875 \text{ in}, K_1 = S_g / S_b = 1,47$$

Selanjutnya ditentukan tinggi potongan (h):

$$h = d_b (K_1 - 1) = 24,31 (1,47 - 1) = 11,415 \text{ in} \rightarrow \text{Rencanakan } h = 10 \text{ in}$$

Kemudian lubang diletakkan pada jarak 0,1 dari setengah bentang. Sehingga dengan perbandingan segitiga didapat nilai $V_{max} = 0,9 V$. Sudut potongan direncanakan dengan perhitungan:

$$\phi = 45^\circ \text{ sehingga } \theta = 90 - \phi = 90 - 45 = 45^\circ = 0,79 \text{ (dalam } \pi \text{ radian)}$$

Untuk menjaga tegangan geser vertikal pada *stem* dari penampang T maka nilai h tidak boleh melewati ketentuan h_{batas} berikut:

$$d_T = \frac{V_{max}}{2 t_w \bar{\tau}} = \frac{(0,9)(64751,172)}{2(0,515)(20000)} = 2,608 \text{ in}$$

$$h_{batas} = d_b - 2 d_T = 24,31 - 2(2,608) = 19,095 > 10 \text{ (Asumsi Layak)}$$

$$d_g = d_b + h = 24,31 + 12 = 34,31 \text{ in}$$

$$d_T = \frac{d_g}{2} - h = \frac{36,31}{2} - 10 = 7,155 \text{ in}$$

$$d_s = d_T - t_f = 7,155 - 0,875 = 6,28 \text{ in}$$

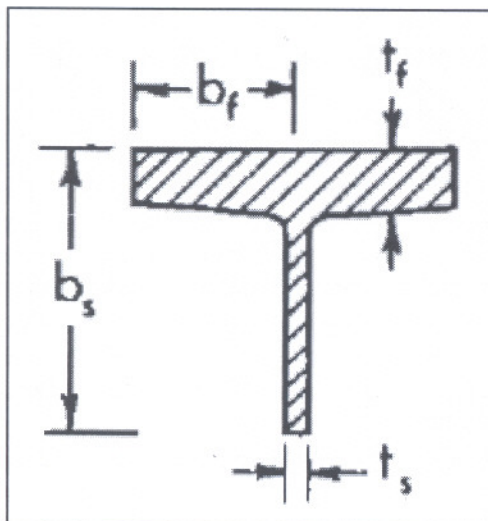
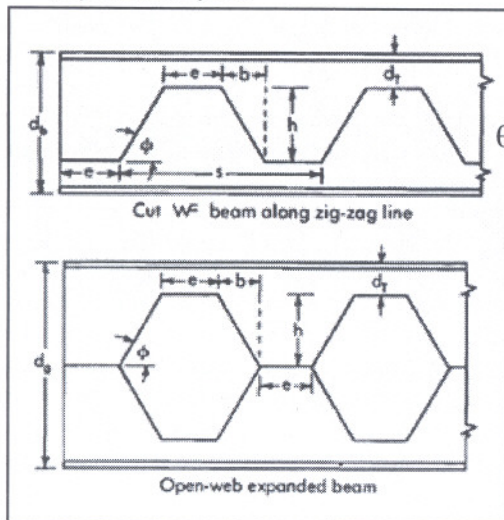
Kemudian diperiksa kompak dari penampang (*buckling* akibat tekanan axial):

$$\frac{b_f}{t_f} \leq \frac{3000}{\sqrt{f_y}} \rightarrow \frac{(0,5)(9,065)}{0,875} \leq \frac{3000}{\sqrt{5000}}$$

$$5,18 \leq 13,416$$

$$\frac{b_s}{t_s} \leq \frac{4000}{\sqrt{f_y}} \rightarrow \frac{7,155}{0,515} \leq \frac{4000}{\sqrt{5000}}$$

$$13,893 \leq 17,889$$



Gambar 2. Keterangan Notasi *Castellated Beam*
Sumber: Blodgett (1996)

Kemudian ditentukan tegangan geser izin, untuk $f_y = 50 \text{ ksi}$ maka:

$$\sigma = 30000 - 27,34 \left(\frac{h}{t_w} \right)^2 = 30000 - 27,34 \left(\frac{10}{0,515} \right)^2 =$$

$$19691,771 \text{ psi}$$

$$\bar{\tau} = \frac{4\theta^2}{3 \tan \theta} \sigma = \frac{4(0,79)^2}{3 \tan(45^\circ)} (19691,771) = 16386,179$$

$$< 20000$$

Jadi yang digunakan sebagai tegangan izin

$\bar{\tau} = 16386,179 \text{ psi}$. Selanjutnya dihitung tegangan geser maksimum sepanjang sumbu netral penampang *web* balok:

$$\tau_{\max} = (1,16) \frac{V_{\max}}{t_w d_g} = (1,16) \frac{0,9(64751,172)}{(0,515)(24,31)} = 3825,782 \text{ psi}$$

Dengan mengetahui tegangan geser maksimum pada *web* dan tegangan geser izin maka didapat rasio:

$$K_2 = \frac{e}{s} = \frac{\tau_{\max}}{\bar{\tau}} \quad \text{dari} \quad \bar{\tau} = \tau_{\max} \left(\frac{s}{e} \right) \rightarrow$$

$$\frac{e}{s} = \frac{\tau_{\max}}{\bar{\tau}} = \frac{3825,782}{16386,1792} = 0,233$$

$$e = \frac{2 \cdot h \cdot \tan \theta}{\frac{1}{K_2} - 2} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \tan 45}{\frac{1}{0,233} - 2} = 8,76 \text{ in} \rightarrow$$

Ambil jarak antar lubang, yaitu $e = 8,5 \text{ in}$.

Terakhir, dihitung ukuran dari *castellated beam*:

$$A_f = b_f \cdot t_f = 9,065 \times 0,875 = 7,932 \text{ in}^2 \text{ dan}$$

$$A_s = d_s \cdot t_w = 6,28 \times 0,515 = 3,234 \text{ in}^2$$

$$A_T = A_s + A_f = 7,932 + 3,234 = 11,2 \text{ in}^2$$

$$M_y = A_f \left(d_s + \frac{t_f}{2} \right) + A_s \frac{d_s}{2} = 7,932 \left(6,28 + \frac{0,875}{2} \right) + 3,234 \frac{6,28}{2} = 63,438 \text{ in}^3$$

$$\frac{0,875}{2} + 3,234 \frac{6,28}{2} = 63,438 \text{ in}^3$$

$$I_y = A_f \left(d_s^2 + d_s t_f + \frac{t_f^2}{3} \right) + A_s = 400,948 \text{ in}^4$$

$$c_s = \frac{M_y}{A_T} = \frac{64,438}{11,2} = 5,7 \text{ in}$$

$$I_T = I_y - c_s M_y = 400,94 - 5,7 (63,438) = 40,54 \text{ in}^4$$

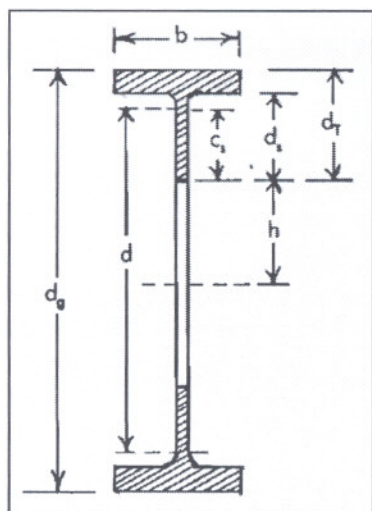
$$S_s = \frac{I_T}{c_s} = \frac{40,54}{5,7} = 7,112 \text{ in}^3$$

$$d = 2 (h + c_s) = 2 (10 + 5,7) = 31,4 \text{ in}$$

$$I_g = 2 I_T + \frac{A_T \cdot d^2}{2} =$$

$$2(40,54) + \frac{(11,2)(31,4)^2}{2} = 5602,456 \text{ in}^4$$

$$S_g = \frac{2 I_g}{d_g} = \frac{2(5602,456)}{34,31} = 326,579 \text{ in}^3$$



Gambar 3. Ukuran Castellated Beam

Tegangan yang terjadi diperiksa keamanannya:

$$\bar{\sigma} = 30000 - 6,84 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2 = 30000 - 6,84 \left(\frac{8,5}{0,515} \right)^2 = 28136,714 < 30000$$

Jadi yang digunakan sebagai tegangan izin di lubang, $\bar{\sigma} = 28136,714$ psi

Cek tegangan lentur sekunder di lubang dekat perletakan:

$$\sigma_T = \frac{V_{\max} \cdot e}{4 \cdot S_s} = \frac{0,9(64751,173)(8,5)}{4(7,136)} = 17354,931 \text{ psi} < 28136,714 \text{ psi}$$

Cek tegangan lentur utama di tengah bentang:

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{d \cdot A_T} = \frac{(9787275,85)}{31,363(11,2)} = 27830,061 \text{ psi} < 28136,714 \text{ psi}$$

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{S_g} = \frac{(9787275,85)}{326,579} = 29969,127 \text{ psi} < 30000 \text{ psi}$$

Cek web buckling akibat gaya geser horisontal:

$$\sigma_r(\max) = \frac{3 \cdot V_{\max} \cdot \tan \theta}{4 t_w \cdot e \cdot \theta^2} = \frac{3 \cdot 64751,173 \cdot \tan 45^\circ}{4(0,515)(8,5)(0,79)^2} = 17775 < 28136 \text{ psi}$$

Jadi tidak perlu dipasang pengaku baji sepanjang lubang. Terakhir, cek tegangan geser maksimum yang terjadi:

$$V_h = V_x \left(\frac{s}{d} \right) = 0,9 \times 64751,173 \left(\frac{37}{31,4} \right) = 68669,238 \text{ lbs}$$

$$\tau = \frac{V_h}{t_w \cdot e} = \frac{68669,238}{0,515(8,5)} = 15686,862 \text{ psi}$$

$$< 16386,179 \text{ psi}$$

SIMPULAN

Penampang *castellated beam* layak untuk dijadikan profil pada balok induk jembatan baja komposit. Pada perencanaan jembatan ini dihasilkan struktur jembatan yang aman, nyaman dan efisien. Jembatan dikatakan aman karena tegangan-tegangan dan momen puncak yang terjadi pada penampang balok kurang dari tegangan izin.

Jembatan lebih efisien karena balok utama menggunakan profil *castellated beam* dari *wide flange*. Profil ini memiliki keuntungan momen nominal yang lebih tinggi daripada profil *wide flange* biasa sehingga berpengaruh terhadap berat menjadi lebih ringan. Jembatan juga lebih efisien karena lubang yang ada sepanjang bentang *castellated beam* dapat dimanfaatkan untuk pekerjaan *ducting* seperti pemipaan drainase jalan, kabel listrik atau utilitas jembatan lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Blodgett, Omer W., 1996. *Design of Welded Structure*, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Ohio.
- Demirdjian, Sevak., 1999. "Stability of Castellated Beam Webs", *Theses to Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University*, Montreal.
- Dervinis, Benediktas., Kvedaras, Audronis Kazimieras., 2008. "Investigation of Rational Depth of Castellated Steel I-Beams", *Journal of Civil Engineering and Management Vilnius Gediminas Technical University*, Vol. 14(3) pp. 163 – 168.
- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum. *Standar Jembatan Gelagar Komposit* (MBI/A/B).
- SNI T-12-2004, Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan, Badan Standardisasi Nasional, 2004..

Salmon, Charles., Johnson, John., 1992.
Struktur Baja Desain dan Perilaku Jilid I, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
Salmon, Charles., Johnson, John., 1995.
Struktur Baja Desain dan Perilaku Jilid II, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Segui, William T., 1994. *LRFD Steel Design*,
PWS Publishing Company, Amerika Serikat.
Supriyadi, Bambang., Muntohar, Agus Setyo., 2000. *Jembatan*, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.